

Primljen / Received: 21.1.2016.

Ispravljen / Corrected: 4.11.2016.

Prihvaćen / Accepted: 20.1.2017.

Dostupno online / Available online: 10.2.2017.

Primjena rezultata statičkog penetracijskog pokusa za klasifikaciju tla

Autori:

Doc.dr.sc. **Lovorka Librić**, mag.ing.aedif.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za geotehniku

llibric@grad.hrIzv.prof.dr.sc. **Danijela Jurić-Kačunić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za geotehniku

djk@grad.hrProf.dr.sc. **Meho Saša Kovačević**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za geotehniku

msk@grad.hr

Prethodno priopćenje

Lovorka Librić, Danijela Jurić-Kačunić, Meho Saša Kovačević

Primjena rezultata statičkog penetracijskog pokusa za klasifikaciju tla

U radu je prikazana primjena rezultata CPT pokusa za klasifikaciju tla prema Jedinstvenoj klasifikaciji tla (USCS) i Europskoj klasifikaciji tla (ESCS) korištenjem računalnog programa KLASIF. Prikazane su korelacije između rezultata CPT pokusa i parametara za klasifikaciju tla. Na primjeru kanala za navodnjavanje Biđ-Bosutskog polja pokazano je relativno uspješno klasificiranje tla pomoću CPT pokusa.

Ključne riječi:

klasifikacija tla, CPT, korelacija, norma, USCS, ESCS

Preliminary note

Lovorka Librić, Danijela Jurić-Kačunić, Meho Saša Kovačević

Application of cone penetration test (CPT) results for soil classification

The paper presents an application of CPT results for soil classification according to Unified Soil Classification System (USCS) and European Soil Classification System (ESCS) by using computer program KLASIF. The correlations between the CPT results and the parameters for soil classifications are shown. The relatively good success in soil classification using CPT results on the example of irrigation canal in Biđ bosut field is presented.

Key words:

oil classification, CPT, correlation, standard, USCS, ESCS

Vorherige Mitteilung

Lovorka Librić, Danijela Jurić-Kačunić, Meho Saša Kovačević

Anwendung von Resultaten des statischen Penetrationsversuches zur Bodenklassifizierung

In dieser Arbeit wird die Anwendung von Resultaten des CPT Versuchs zur Bodenklassifizierung gemäß einheitlicher Bodenklassifizierung (USCS) und Europäischer Bodenklassifizierung (ESCS) mittels des Computerprogramms KLASIF dargestellt. Korrelationen zwischen Resultaten des CPT Versuchs und Parametern der Bodenklassifizierung werden erläutert. Am Beispiel des Bewässerungskanals des Feldes von Biđ-Bosut wurde eine relativ erfolgreiche Bodenklassifizierung basierend auf CPT Versuchen aufgezeigt.

Schlüsselwörter:

Bodenklassifizierung, CPT, Korrelation, Normen, USCS, ESCS

1. Uvod

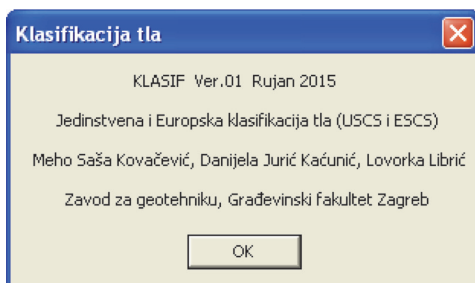
Klasificiranje odnosno podjela tla u grupe i podgrupe s odgovarajućim oznakama omogućava razumijevanje mehaničkog ponašanja tla pod djelovanjem opterećenja. Tradicionalno se prema veličini zrna obavlja podjela tla na nekoherentna odnosno krupnozrna tla (šljunci i pijesci) i koherentna odnosno sitnozrna tla (prahovi i gline). Nekoherentna tla se dalje opisuju i označavaju ovisno o relativnim odnosima njihovih udjela u ukupnoj masi ispitivanog tla, a koherentna tla ovisno o njihovim plastičnim svojstvima. Procedura pomoću koje se opisuju i označavaju tla naziva se klasifikacija tla.

Najpoznatija i najšire korištena klasifikacija tla u svijetu je Jedinstvena klasifikacija tla, USCS (eng. *Unified Soil Classification System*) nastala modificiranjem klasifikacije ACS (eng. *Airfield Classification System*) [1, 2]. U Europi značajnu primjenu nalaze klasifikacije tla BSCS (eng. *British Soil Classification System*) [3-5] i DIN (njem. *Deutsches Institut für Normen*) [6]. Kovačević i Jurić-Kačunić [7] razvili su Europsku klasifikaciju tla za inženjerske potrebe ESCS (eng. *European Soil Classification System*) koja koristi opis i simbole označavanja tla prema europskoj normi EN ISO 14688-1 [8, 9] i zasniva se na načelima klasifikacije tla prema europskoj normi EN ISO 14688-2 [10,11].

Da bi se osigurala prilagodba europskim smjernicama za opis i klasifikaciju tla, Kovačević i dr. [12] smatraju da je potrebno razviti informatičku podršku za provođenje ESCS i USCS klasifikacija tla kojom bi se olakšala njihova jednostavna paralelna primjena, odnosno lagan prijelaz na klasificiranje tla u skladu s europskim smjernicama.

2. Informatička podrška za provođenje USCS i ESCS klasifikacije tla

Računalni program KLASIF razvijen je na Zavodu za geotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Program predstavlja informatičku podršku za provođenje Jedinstvene (USCS) i Europske (ESCS) klasifikacije tla i olakšava njihovu paralelnu primjenu (slika 1.).



Slika 1. Program KLASIF

KLASIF je razvijen koristeći integrirani programski jezik Visual Basic za aplikacije (VBA) koji omogućava programiranje specijalnih funkcija koje nisu standardno uključene u Excel. Program se može preuzeti s linka: http://www.grad.unizg.hr/zavod_na_geotehniku.

Ulazni podaci za obje klasifikacije su isti što omogućava jednostavnu usporedbu dobivenih rezultata. Ukupno se može zadati odnosno promijeniti 8 ulaznih varijabli (slika 2.). Nakon promjene bilo koje ulazne varijable, dobivaju se novi rezultati klasificiranja, što je u skladu s načinom funkcioniranja Microsoft Excela, iako se konačni rezultat klasificiranja prilikom svake njihove promjene ne treba mijenjati. Na primjer, promjena granice tečenja neće utjecati na rezultat obje klasifikacije ako se radi o tlu čiji je postotak sitnih čestica manji od 5 %.

Na slici 3. prikazani su rezultati klasificiranja tla programom KLASIF za za USCS i ESCS klasifikaciju.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	Jedinstvena i Europska klasifikacija tla (USCS i ESCS)							
3								
4	Organsko tlo (D/N)		n					
5								
6	% šljunka	92.00		D ₆₀	0.52		w _L	26.00
7	% pijeska	15.00		D ₃₀	0.17		w _p	21.00
8	% sitnih čestica	-7.00		D ₁₀	0.05		I _p	5.00
9				c _u	10.400			
10				c _c	1.112			

Slika 2. Prikaz unosa ulaznih varijabli u program KLASIF

Jedinstvena i Europska klasifikacija tla (USCS i ESCS)			
Organsko tlo (D/N)		n	
% šljunka	0.00	D ₆₀	0.52
% pijeska	32.78	D ₃₀	0.17
% sitnih čestica	67.22	D ₁₀	0.05
		c _u	10.400
		c _c	1.112
Jedinstvena klasifikacija tla			
Unified Soil Classification System (USCS)			
Sitnozrno tlo (više ili jednako od 50 % sitnih čestica)			
Granica tečenja manja od 50 %			
Posna glina			
Količina krupnih čestica jednaka ili veća od 30 % (% pijeska >= % šljunka)			
Količina šljunka manja od 15 % ne utječe na naziv grupe tla			
Naziv grupe		Simbol	
Pjeskovita posna glina		CL	
Europska klasifikacija tla			
European Soil Classification System (ESCS)			
Sitnozrno tlo (jednako ili više od 50 % sitnih čestica)			
Granica tečenja manja između 30 % i 50 %			
Glina			
Količina krupnih čestica jednaka ili veća od 15 %			
% pijeska >= % šljunka			
Naziv grupe		Simbol	
Pjeskovita glina srednje plastičnosti		sa CII	
Literatura			
ASTM D 2487-11: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.			
HRN EN ISO 14688-2:2008 en: Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Identifikacija i kalsifikacija tla - 2. dio: Načela klasifikacije. Zagreb, Hrvatski zavod za norme. 2008.			
Kovačević, M.S., Jurić-Kačunić, D.: Europska kalsifikacija tla za inženjerske potrebe, GRAĐEVINAR 66 (2014) 9, pp. 801-810, doi: 10.14256/JCE.1077.2014.			

Slika 3. Klasifikacija tla programom KLASIF

3. Statički penetracijski pokus (CPT)

Osnovni princip izvođenja CPT pokusa ogleda se u utiskivanju posebne sonde u tlo određenom brzinom, uz konstantno mjerenje otpora utiskivanju na šiljku sonde i trenja po plaštu sonde koje se aktivira prilikom utiskivanja sonde između plašta i okolnog tla. Osim otpora utiskivanju i trenja po plaštu, mogu se mjeriti porni tlak i temperatura u okolini sonde, prikupljati podaci o brzinama širenja seizmičkih valova i slično. CPT pokus ima široku primjenu u različitim vrstama tla. Prednosti CPT pokusa su: brzo i kontinuirano mjerenje, ponovljivost i pouzdanost mjerenja, ekonomičnost i produktivnost te jake teoretske osnove za interpretaciju. Nedostaci su: utiskivanje može biti ograničeno u šljuncima i cementiranim tlima, zahtijevaju se vješt rukovatelji, ne vadi se uzorak tla te velika početna ulaganja u opremu i obuku ljudstva.

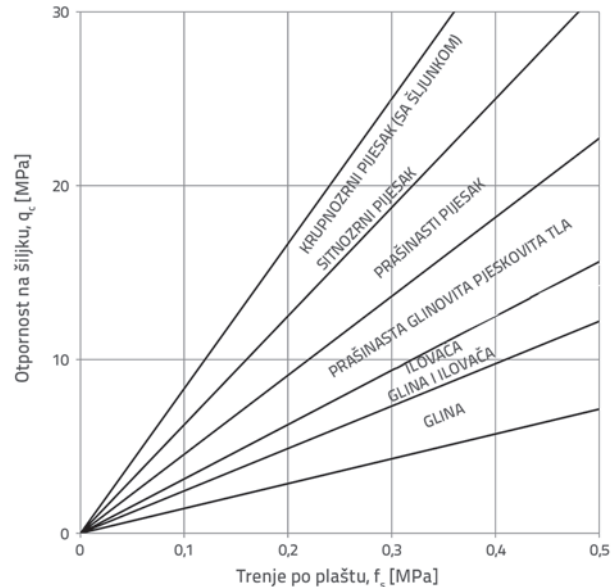
Za vrijeme utiskivanja CPT sonde konstantno se očitavaju sljedeće osnovne veličine: otpor na šiljku sonde (q_c), trenje po plaštu sonde (f_s) te porni tlak (u_2). Otpor na šiljku sonde (q_c) predstavlja naprezanje dobiveno kao omjer ukupne aksijalne sile na šiljak i površine poprečnog presjeka (baze) šiljka. Trenje po plaštu sonde (f_s) predstavlja naprezanje dobiveno kao omjer ukupne sile trenja sonde i tla koja se javlja na kontaktu plašta sonde i razvijene površine plašta. Porni tlak (u_2) predstavlja zbroj *in situ* pornog tlaka u_0 i porasta pornog tlaka Δu zbog utiskivanja šiljka u tlo. Zbog tehnologije ugradnje mjerača tlaka u sondu, pojavljuje se dodatni otpor na šiljku, pa se kao mjerena veličina koristi korigirani otpor na šiljku $q_t = q_c + u_2(1-\alpha)$, gdje je α koeficijent neto površine šiljka dobiven kalibracijom u laboratoriju (0,70-0,85). Za potrebe interpretacije rezultata CPT pokusa često se koristi veličina poznata kao koeficijent trenja (R_f) koja je definirana omjerom trenja po plaštu i otpora na šiljku sonde na promatranoj dubini.

Uz pomoć tri izmjerene veličine za vrijeme utiskivanja sonde u tlo (q_t , f_s i u_2), tijekom dugogodišnjih istraživanja temeljenim na numeričkoj simulaciji procesa utiskivanja sonde u tlo i usporedbi sa rezultatima drugih terenskih i laboratorijskih ispitivanja, uspostavljene su procedure za klasifikaciju odnosno određivanje profila tla, određivanje mehaničkih karakteristika tla, određivanje parametara tečenja i konsolidacije tla te indicaciju osjetljivosti tla na likvefakciju [13].

4. Dijagrami za klasifikaciju tla pomoću CPT pokusa

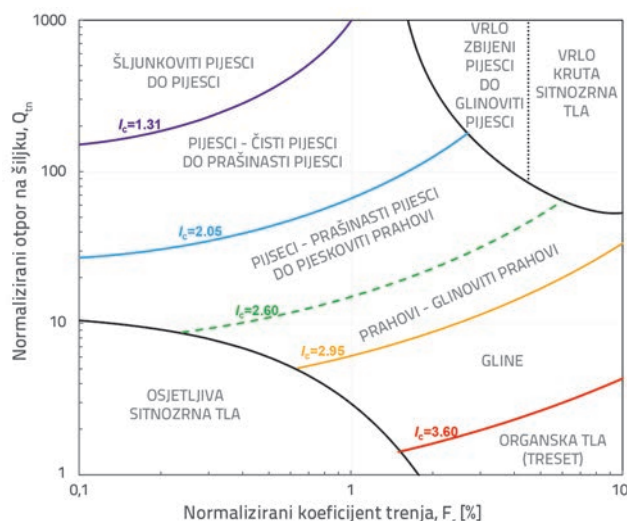
Istraživanjem dijagrama za klasifikaciju tla pomoću CPT pokusa znanstvenici se bave zadnjih 50 godina. Prva istraživanja prikazao je Begemann 1965. godine [14]. Utvrdio je da krupnozrna tla općenito imaju veće vrijednosti otpora na šiljku q_c i trenja na plaštu f_s u odnosu na sitnozrna tla, te da se klasificiranje tla ne može povezati samo s otporom na šiljku ili trenjem po plaštu, nego s njihovom kombinacijom. Pokazao je da je vrsta tla funkcija odnosa između trenja po plaštu i otpora na šiljku, odnosno koeficijenta trenja R_f . Izradio je dijagram

ovisnosti trenja po plaštu u odnosu na otpor na šiljku (slika 4.) u kojem su koeficijenti trenja nagibi linija koji ograničavaju pojedinu vrstu tla. Begemannov dijagram izrađen je na temelju pokusa s mehaničkim šiljkom u nizozemskim tlima i vezan je isključivo na geološke uvjete na temelju kojih je i razvijen. Zbog toga danas nema širu primjenu jer, na primjer, koeficijent trenja u pijescima uobičajeno ima vrijednost manju od 1 % dok je najmanji nagib u njegovom dijagramu 1,2 %.



Slika 4. Dijagram za klasifikaciju tla prema Begemannu [14]

Sanglerat i dr. su 1974. godine predložili dijagram ovisnosti koeficijenta trenja i otpora na šiljku i time potvrdili pretpostavku da je vrsta tla funkcija koeficijenta trenja kao neovisne i otpora na šiljku kao ovisne varijable [15]. Schmertmann je 1978. godine, između ostalog, upozorio na činjenicu da porni tlak koji djeluje na CPT sondu može značajno utjecati na odabir vrste tla prema dotadašnjim dijagramima [16]. Prvi koji su predložili dijagram za klasifikaciju tla pomoću električnog penetrometra i povezali taj dijagram s USCS klasifikacijom tla bili su Douglas i Olsen 1981. godine [17]. Porni tlak i stanje naprezanja u dijagram za klasifikaciju tla uključili su Jones i Rust 1982. godine [18]. Prvi koji su uveli korekciju otpora na šiljku za vrijednost izmjenjenog pornog tlaka bili su Robertson i dr. 1986. godine [19]. Predložili su i klasifikacijski dijagram u kojemu vrsta tla ovisi o koeficijentu pornog tlaka i korigiranom otporu na šiljku. Robertson je 1990. godine uočio da su dotadašnji dijagrami rađeni na temelju rezultata CPT pokusa na dubinama manjim od 30 m, zbog čega se rezultati klasifikacije znatno razlikuju na većim dubinama za istu vrstu tla. Predložio je uvođenje normaliziranih vrijednosti otpora na šiljku i koeficijenta trenja u odnosu na vrijednost normalnih vertikalnih ukupnih i efektivnih naprezanja u tlu [20]. Robertson je 2009. godine poboljšao predloženi dijagram uvođenjem normaliziranih vrijednosti vertikalnih efektivnih naprezanja [21]. Mayne je 2016. prilagodio Robertsonov dijagram razgraničavajući tipove tla prema vrijednosti indeksa tipa ponašanja tla I_c (slika 5.) [22].



Slika 5. Dijagram za klasifikaciju tla prema Mayneu [22]

5. Korelacije između parametara za laboratorijsku klasifikaciju tla i rezultata CPT pokusa

Za laboratorijsko klasificiranje tla koriste se četiri grupe parametara. Prva grupa sastoji se od jednog parametra koji predstavlja podatak o tome da li uzorak tla koji se ispituje sadrži organske tvari. Takvi uzorci imaju tamniju boju i neugodan miris. Druga grupa sastoji se od tri parametra koji predstavljaju postotke udjele mase šljunka, pijeska i sitnih čestica u ukupnoj masi tla. Dobivaju se pokusom određivanja granulometrijskog sastava tla prema američkim odnosno hrvatskim normama, ovisno o tome provodi li se USCS ili ESCS klasifikacija tla [23, 24]. S obzirom na to da se klasifikacija tla provodi na uzorcima tla kod kojih su sijanjem odstranjena zrna čiji je promjer veći od najvećeg promjera zrna šljunka, zbroj postotaka šljunka, pijeska i sitnih čestica mora biti jednak 100.

Treća grupa sastoji se od dva parametra koji karakteriziraju granulometrijsku krivulju tla. Ti parametri su koeficijent jednoličnosti, $c_u = D_{60}/D_{10}$ i koeficijent zakrivljenosti, $c_c = D_{30}^2/(D_{60} \cdot D_{10})$. D_{10} , D_{30} i D_{60} se dobivaju iz rezultata pokusa određivanja granulometrijskog sastava tla, a predstavljaju karakteristične promjere zrna od kojih 10 %, 30 % i 60 % mase uzorka ima zrna manjeg promjera.

Četvrta grupa sastoji se od dva parametra koji karakteriziraju plastična svojstva tla. Ti parametri su granica tečenja w_L i indeks plastičnosti $I_p = w_L - w_p$. Granica tečenja w_L i granica plastičnosti w_p dobivaju se pokusima određivanja Atterbergovih granica prema američkim odnosno hrvatskim normama, ovisno o tome provodi li se USCS ili ESCS klasifikacija tla [25, 26].

5.1. Sadržaj organskih tvari

Sva dosadašnja istraživanja pokazuju da organska tla imaju vrlo velik koeficijent trenja po plaštu i vrlo mali otpor na šiljku [14, 16,

20, 27, 28]. Prema Robertsonu [20], tlo sadrži organske tvari ako je indeks tipa ponašanja tla $I_c > 3,60$:

$$I_c = \sqrt{(3,47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1,22)^2} > 3,60 \quad (1)$$

gdje su Q_{tn} i F_r normalizirani otpor na šiljku i normalizirani koeficijent trenja koji se izračunavaju prema izrazima:

$$Q_{tn} = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{p_a} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n \quad (2)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \cdot 100 \% \quad (3)$$

gdje su:

- σ_{vo} - vertikalno ukupno naprezanje u tlu
- σ'_{vo} - vertikalno efektivno naprezanje u tlu
- p_a - atmosferski tlak (100 kPa)
- n - eksponent naprezanja ovisan o tipu tla i veličini naprezanja koji može imati vrijednost između 0 i 1. Taj se eksponent izračunava prema izrazu:

$$n = 0,381 \cdot I_c + 0,05 \cdot \left(\frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right) - 0,15 \quad (4)$$

Ako se u izraz (4) uvrste izrazi (1) i (2), za izračunavanje eksponenta naprezanja n dobiva se:

$$n = 0,381 \cdot \left(\sqrt{\left(3,47 - \log \left(\frac{q_t - \sigma_{vo}}{p_a} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n \right) \right)^2 + (\log F_r + 1,22)^2} \right) + 0,05 \cdot \left(\frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right) - 0,15 \quad (5)$$

Kako se eksponent naprezanja n u izrazu (5) nalazi i s lijeve i s desne strane jednadžbe, potrebno je primijeniti iterativni postupak za njegovo izračunavanje. U prvoj iteraciji uzima se da je na desnoj strani $n = 1,0$ i izračunava nova vrijednost n . Postupak se ponavlja dok razlika vrijednosti eksponenta Δn u dvije uzastopne iteracije ne bude jednaka ili manja od 0,01.

Da bi se odredilo vertikalno ukupno i efektivno naprezanje u tlu, potrebno je osim poznavanja razine podzemne vode odrediti i zapreminsku težinu tla. Prema Maineu [22], zapreminska težina tla γ (kN/m³) može se izračunati primjenjujući tenje po plaštu f_s (kPa) prema izrazu:

$$\gamma = 26 - \frac{14}{1 + (0,5 \cdot \log(f_s + 1))^2} \quad (6)$$

5.2. Postotak sitnih čestica

Prvi korak u provođenju klasifikacije tla je razdvajanje na sitnozrna i krupnozrna tla. Prema USCS i ESCS klasifikacijama tlo se klasificira kao sitnozarno ako 50 % ili više od ukupne količine suhog uzorka prođe kroz sito veličine otvora 0,075 mm (sito br. 200) odnosno 0,063 mm [7].

Postotak sitnih čestica u tlu raste s porastom koeficijenta trenja po plaštu uz istovremeno smanjenje otpora na šiljku [29-33].

Prema Robertsonu i Wrideu [29], postotak sitnih čestica (FC) može se izračunati na osnovi indeksa tipa ponašanja tla I_c prema izrazima:

$$\text{za } I_c < 1,26; \quad FC = 0 \text{ [\%]} \quad (7.a)$$

$$\text{za } 1,26 \leq I_c < 3,50; \quad FC = 1,75 \cdot I_c^{3,25} \text{ [\%]} \quad (7.b)$$

$$\text{za } I_c > 3,50; \quad FC = 100 \text{ [\%]} \quad (7.c)$$

$$\text{za } 1,64 \leq I_c < 2,36 \text{ i } F_r < 0,5 \text{ [\%]}; \quad FC = 5 \text{ [\%]} \quad (7.d)$$

5.3. Koeficijenti jednoličnosti i zakrivljenosti

Prema USCS klasifikaciji, ovisno o koeficijentima jednoličnosti c_u i zakrivljenosti c_c , krupnozrno tlo može biti dobro i loše graduirano, a prema ESCS klasifikaciji, krupnozrno tlo može biti dobro, srednje i loše graduirano [7].

Koeficijent jednoličnosti c_u raste, a koeficijent zakrivljenosti c_c pada s porastom kuta unutarnjeg trenja ϕ [34–36]. Prema Royu i Dassu [34], koeficijenti jednoličnosti i zakrivljenosti mogu se izračunati na osnovi kuta unutarnjeg trenja prema izrazima:

$$c_u = 0,794 \cdot \phi - 19,548 \quad (8)$$

$$c_c = -0,083 \cdot \phi + 3,127 \quad (9)$$

Kut unutarnjeg trenja ϕ raste s porastom otpora na šiljku [37–39]. Prema Kulhawyu i Mayneu [37], kut unutarnjeg trenja može se izračunati na osnovi otpora na šiljku prema izrazu:

$$\phi = 17,6 + 11,0 \cdot \log \left(\frac{q_t}{\sqrt{p_a \cdot \sigma'_{vo}}} \right) \quad (10)$$

Ako se izraz (10) uvrsti u izraz (8), dobiva se izraz za izračunavanje koeficijenta jednoličnosti na osnovi rezultata statičkog penetracijskog pokusa:

$$c_u = -5,574 + 8,734 \cdot \log \left(\frac{q_t}{\sqrt{p_a \cdot \sigma'_{vo}}} \right) \quad (11)$$

Uvrsti li se izraz (10) u izraz (9), dobiva se izraz za izračunavanje koeficijenta zakrivljenosti na osnovi rezultata statičkog penetracijskog pokusa:

$$c_c = 1,666 - 0,913 \cdot \log \left(\frac{q_t}{\sqrt{p_a \cdot \sigma'_{vo}}} \right) \quad (12)$$

5.4. Granica tečenja i indeks plastičnosti

Granica tečenja w_L i indeks plastičnosti I_p rastu s porastom koeficijenta trenja po plaštu uz istovremeno smanjenje otpora na šiljku [31, 40, 41]. Prema Cetinu i Ozanu [31], granica tečenja i indeks plastičnosti mogu se izračunati prema izrazima:

$$w_L = 10^{(1,506 + 0,310 \log F_r - \log q_{t,1,net} / 2,526)} \quad (13)$$

$$I_p = 10^{(1,058 + 0,592 \log F_r - \log q_{t,1,net} / 2,206)} \quad (14)$$

gdje je $q_{t,1,net}$ normalizirani neto otpor na šiljku koji se izračunava prema izrazu (15):

$$q_{t,1,net} = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\left(\frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right)^c} \quad (15)$$

Eksponent naprezanja c iz izraza (15) ovisi o tipu tla i veličini naprezanja te može imati vrijednost između 0,25 i 1 i izračunava se prema izrazu:

$$c = \frac{R - 272,38}{275,19 - 272,38} \quad 272,38 < R < 275,19 \quad (16)$$

Parametar R u izrazu (16) je sličan indeksu tipa ponašanja tla I_c i izračunava se prema izrazu:

$$R = \sqrt{(\log q_{t,1,net} - 233,52)^2 + (\log F_r + 55,42)^2} \quad (17)$$

Ako se u izraz (16) uvrste izrazi (15) i (17), za izračunavanje eksponenta naprezanja c dobiva se:

$$c = \frac{\sqrt{\left(\frac{q_t - \sigma_{vo}}{\left(\frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right)^c} - 233,52 \right)^2 + (\log F_r + 55,42)^2} - 272,38}{275,19 - 272,38} \quad (18)$$

Kako se eksponent naprezanja c u izrazu (18) nalazi i s lijeve i s desne strane jednadžbe, potrebno je primijeniti iterativni postupak za njegovo izračunavanje. U prvoj iteraciji uzima se da je na desnoj strani $c = 1,0$ i izračunava se nova vrijednost c . Postupak se ponavlja dok razlika vrijednosti eksponenta Δc u dvije uzastopne iteracije ne bude jednaka ili manja od 0,01.

6. Primjena rezultata CPT pokusa za klasifikaciju tla na kanalu za navodnjavanje Biđ-Bosutskog polja

Izgradnja dovodnog melioracijskog kanala za navodnjavanje poljoprivrednih površina na području Biđ-Bosutskog polja, duljine 14772 m, predstavlja prvu fazu realizacije višenamjenskog kanala Dunav-Sava. Radovi na iskupu kanala započeti su na više lokacija prema postojećem glavnom projektu. Projektirani pokos kanala u gornjem dijelu ima nagib 1:2. U srednjem dijelu prelazi u široku bermu, da bi u donjem dijelu imao nagib 1:3. Prosječna dubina kanala iznosi oko 7 m. Iskop je rađen strojno bagerima koji su uobičajeni kod takvih zemljanih radova (slika 6.) [13]. Temeljno tlo na lokaciji kanala sastoji se od tanjeg površinskog sloja humusa ispod kojeg je sloj niskoplastične do viskoplastične gline, ispod koje se rasprostiru rahli pijesci s različitim udjelom sitnih čestica. Podzemna voda zabilježena je na dubini 4 do 5 m. Prilikom iskopa na drugoj i četvrtoj dionici kanala 2012. godine,



Slika 6. Izvedba radova na iskopu kanala [13]

iako su vodostaji podzemne vode bili niski, došlo je do problema vezanih na stabilnost pokosa, otežanog iskopa i profiliranja kanala. Poseban problem predstavljao je iskop ispod razine podzemne vode u pijescima i prašinstim pijescima. Prilikom iskopa pod vodom tlo se odmah razmuljivalo, a pokosi su

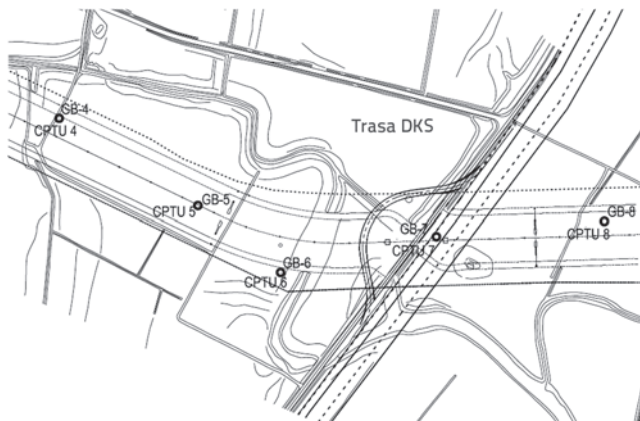
erodirali. Došlo je do prekida radova kako bi se iznašlo optimalno rješenje iskopa kanala kao što su izvedba blagih nagiba pokosa pod vodom, izvedba u suhom uz crpljenje vode iz tla i građevne jame, površinska zaštita i slično. Kako je bilo očito da istražni radovi, provedeni za potrebe izrade glavnog projekta nisu bili usmjereni prema rješavanju problema izvedbe iskopa pod vodom u rahlim i prašinstim odnosno glinovitim pijescima, predviđena je izvedba dodatnih istražnih radova s namjerom da se dobije bolji i detaljniji uvid u temeljno tlo u zoni kanala.

Dodatni geotehnički istražni radovi na stacionaži trase od km 0+600 do km 4+800 obuhvatili su: izvedbu 15 istražnih bušotina dubine 12 m na prosječnom razmaku od 300 m s klasifikacijom jezgre, vađenjem reprezentativnih uzoraka tla za ispitivanje u laboratoriju te izvedbu standardnih penetracijskih pokusa (SPT) u bušotini, izvedbu sondažnih jama dubine 4 do 5 m na svakih 150 m duž razmatrane trase kanala zajedno s klasifikacijom tla i uzimanjem uzorka za laboratorijsko ispitivanje, izvedbu statičkog penetracijskog pokusa (CPT) uz svaku od bušotina zajedno s dva disipacijska pokusa (hold test) po bušotini, izvedbu 15 piezometara s mjernim mjestom na dubini oko 8 m za pokusna crpljenja, izvedenih

Tablica 1. Rezultati provedenih CPT i laboratorijskih klasifikacijskih pokusa

GB/CPTU	RPV	Broj	z [m]	q_t [MPa]	f_s [kPa]	w_L [%]	I_p [%]	FC [%]	c_u	c_c
GB-4/CPTU 4	4,70	1	2,30	1,34	126,10	45,32	21,23	67,95		
		2	3,90	2,48	65,50	36,53	15,02	43,34		
		3	5,20	1,90	36,80	31,15	13,95	54,88		
		4	7,20	1,93	54,40	32,25	14,10	57,22		
		5	11,00	23,07	79,60			4,56	2,94	1,44
GB-5/CPTU 5	5,00	6	2,30	0,91	102,00	47,86	29,20	62,07		
		7	3,40	0,82	82,80	66,12	36,87	74,15		
		8	4,70	1,35	14,50	32,15	14,25	39,22		
		9	6,10	2,09	40,80	36,22	19,12	42,64		
		10	10,50	19,00	82,00			4,02	5,00	1,80
GB-6/CPTU 6	5,60	11	2,00	1,05	92,00	53,25	29,93	65,22		
		12	3,20	0,68	31,00	55,26	31,01	69,12		
		13	6,10	0,82	15,00	47,44	25,81	65,07		
		14	8,10	0,51	13,00	71,25	38,00	92,15		
		15	10,20	10,19	18,00			3,25	4,65	2,12
GB-7/CPTU 7	5,30	16	3,70	1,17	82,00	44,12	32,57	67,22		
		17	4,50	0,90	63,00	66,12	43,87	82,25		
		18	6,40	1,09	55,20	53,42	29,79	61,52		
		19	8,60	1,82	65,66	33,36	14,26	57,98		
		20	10,30	14,27	20,00			4,38	1,92	1,17
GB-8/CPTU 8	4,80	21	3,60	1,21	54,80	46,79	25,98	59,12		
		22	4,60	1,20	37,00	38,91	16,16	62,18		
		23	5,50	1,03	35,40	52,50	29,23	55,82		
		24	6,80	0,98	13,20	35,10	13,26	51,17		
		25	9,10	14,32	66,14			4,55	3,55	1,25

u istažnim bušotinama, te laboratorijske pokuse na uzorcima iz bušotina (granice konzistencije, granulometrijski sastav, izravni posmik). Na slici 7. prikazane su pozicije dijela izvedenih istražnih bušotina (GB-4 do GB-8) i statičkih penetracijskih pokusa (CPTU 4 do CPTU 8) koji su provedeni u ovom radu.



Slika 7. Pozicije izvedenih istražnih radova od km 1+450 do km 2+450

U tablici 1. prikazani su rezultati provedenih statičkih penetracijskih pokusa i laboratorijskih klasifikacijskih pokusa, na istim dubinama poslužili su za određivanje parametara za klasificiranje tla pomoću prikazanih statističkih korelacija. U tablicama 2. i 3. prikazani su usporedni rezultati provedenih USCS i ESCS klasifikacija tla pomoću prikazanog programa KLASIF.

U tablicama 2. i 3. crnom su bojom označeni uzorci kod kojih je primjenom rezultata CPT pokusa i prikazanih korelacija došlo do uspješne klasifikacije tla, a crvenom do neuspješne. Vidljivo je da je kod obje klasifikacije postignut dobar postotak uspješnosti klasificiranja tla pomoću rezultata CPT pokusa, unatoč činjenici da su korištene prikazane korelacije koje su napravljene na različitim tlima širom svijeta i za koje svaki autor upozorava da ih treba provjeriti i korigirati na lokalnom tlu. Razlog za to je činjenica da se kod klasifikacije tla ne traži visoka točnost prognoze vrijednosti parametara za klasifikaciju, već upadanje unutar određenog intervala koji definira pojedini simbol, odnosno naziv grupe tla. Tako je, na primjer, kod USCS klasifikacije važno jedino to hoće li postotak sitnih čestica (F_C)

Tablica 2. Usporedba rezultata laboratorijskog i CPT klasificiranja tla primjenom USCS klasifikacije

Broj	USCS - laboratorij		USCS - CPT	
	Simbol	Naziv grupe	Simbol	Naziv grupe
1	CL	Pjeskovita posna glina	CL	Pjeskovita posna glina
2	SC	Glinoviti pijesak	SC	Glinoviti pijesak
3	CL	Pjeskovita posna glina	SC	Glinoviti pijesak
4	CL	Pjeskovita posna glina	SC	Glinoviti pijesak
5	SP	Slabo građuirani pijesak	SP	Slabo građuirani pijesak
6	CL	Pjeskovita posna glina	CH	Pjeskovita masna glina
7	CH	Masna glina s pijeskom	CH	Masna glina s pijeskom
8	SC	Glinoviti pijesak	SC	Glinoviti pijesak
9	SC	Glinoviti pijesak	SC	Glinoviti pijesak
10	SP	Slabo građuirani pijesak	SP	Slabo građuirani pijesak
11	CH	Pjeskovita masna glina	CL	Pjeskovita posna glina
12	CH	Pjeskovita masna glina	CH	Pjeskovita masna glina
13	CL	Pjeskovita posna glina	CL	Pjeskovita posna glina
14	CH	Masna glina	CH	Masna glina
15	SP	Slabo građuirani pijesak	SP	Slabo građuirani pijesak
16	CL	Pjeskovita posna glina	CH	Pjeskovita masna glina
17	CH	Masna glina s pijeskom	CH	Masna glina s pijeskom
18	CH	Pjeskovita masna glina	CH	Masna glina s pijeskom
19	CL	Pjeskovita posna glina	CL	Pjeskovita posna glina
20	SP	Slabo građuirani pijesak	SP	Slabo građuirani pijesak
21	CL	Pjeskovita posna glina	CL	Pjeskovita posna glina
22	CL	Pjeskovita posna glina	CL	Pjeskovita posna glina
23	CL	Pjeskovita posna glina	CL	Pjeskovita posna glina
24	CL	Pjeskovita posna glina	SC	Glinoviti pijesak
25	SP	Slabo građuirani pijesak	SP	Slabo građuirani pijesak

Tablica 3. Usporedba rezultata laboratorijskog i CPT klasificiranja tla primjenom ESCS klasifikacije

Broj	ESCS - laboratorij		ESCS - CPT	
	Simbol	Naziv grupe	Simbol	Naziv grupe
1	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti
2	clSa	Glinoviti pijesak	clSa	Glinoviti pijesak
3	saCIL	Pjeskovita glina niske plastičnosti	clSa	Glinoviti pijesak
4	saCIL	Pjeskovita glina niske plastičnosti	clSa	Glinoviti pijesak
5	GrP	Slabo građuirani pijesak	GrP	Slabo građuirani pijesak
6	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti	saCIH	Pjeskovita glina visoke plastičnosti
7	saCIH	Pjeskovita glina visoke plastičnosti	saCIH	Pjeskovita glina visoke plastičnosti
8	clSa	Glinoviti pijesak	clSa	Glinoviti pijesak
9	clSa	Glinoviti pijesak	clSa	Glinoviti pijesak
10	GrP	Slabo građuirani pijesak	GrP	Slabo građuirani pijesak
11	saCIH	Pjeskovita glina visoke plastičnosti	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti
12	saCIH	Pjeskovita glina visoke plastičnosti	saCIH	Pjeskovita glina visoke plastičnosti
13	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti
14	CIH	Glina visoke plastičnosti	CIH	Glina visoke plastičnosti
15	GrP	Slabo građuirani pijesak	GrP	Slabo građuirani pijesak
16	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti	saCIH	Pjeskovita glina visoke plastičnosti
17	saCIH	Pjeskovita glina visoke plastičnosti	saCIH	Pjeskovita glina visoke plastičnosti
18	saCIH	Pjeskovita glina visoke plastičnosti	saCIH	Pjeskovita glina visoke plastičnosti
19	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti
20	GrP	Slabo građuirani pijesak	GrP	Slabo građuirani pijesak
21	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti
22	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti
23	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti
24	saCII	Pjeskovita glina srednje plastičnosti	clSa	Glinoviti pijesak
25	GrP	Slabo građuirani pijesak	GrP	Slabo građuirani pijesak

biti unutar 6 mogućih intervala; 0 % - 5 %, 5 % - 12 %, 12 % - 50 %, 50 % - 70 %, 70 % - 85 % i 85 % - 100 %. Kod ESCS klasifikacije radi se o 5 intervala: 0 % - 5 %, 5 % - 15 %, 15 % - 50 %, 50 % - 85 % i 85 % - 100 %. Zbog toga bi bilo povoljnije za klasificiranje tla u statističkim analizama ili primjenom umjetne inteligencije svrstavati postotak sitnih čestica u navedene intervale, umjesto određivanja njene brojčane vrijednosti.

Kod USCS klasifikacije postotak uspješnosti određivanja naziva grupe tla iznosi 72 %, a kod ESCS klasifikacije iznosi 76 %. Razlog tomu je uzorak broj 18 koji prema rezultatima laboratorijskih pokusa ima 38,08 % pijeska, a prema rezultatima CPT pokusa 28,14 % pijeska. Prema USCS klasifikaciji, sitnozrnomo tlu koje sadrži jednako ili više od 30 % pijeska dodaje se na početku naziva grupe naziv "pjeskoviti", a sitnozrnomo tlu koje sadrži između 15 % i 30 % pijeska dodaje se na kraju naziva grupe naziv "s pijeskom". Tako je rezultat laboratorijske klasifikacije "pjeskovita masna glina", a rezultat CPT klasifikacije je "masna glina s pijeskom". Prema ESCS klasifikaciji, sitnozrnomo tlu koje sadrži jednako ili više od 15 % pijeska dodaje se na početku naziva grupe naziv "pjeskoviti". Tako je rezultat i laboratorijske i

CPT klasifikacije "pjeskovita glina visoke plastičnosti".

Uspješnost određivanja simbola tla je jednaka kod obje klasifikacije, iako se može očekivati da će kod većeg broja uzoraka uspješnost ESCS klasifikacije biti veća. Razlog leži u činjenici da se kod USCS klasifikacije istom simbolu mogu pridružiti različiti nazivi grupe tla, a kod ESCS klasifikacije svaki simbol može označavati samo jedan naziv grupe tla. Tako primjerice uzorci broj 14, 17 i 18 kod USCS klasifikacije imaju oznaku CH, a različite nazive grupa tla: "masna glina", "masna glina s pijeskom" i "pjeskovita masna glina".

Relativno dobru prognozu rezultata klasificiranja tla prema USCS i ESCS klasifikaciji, postignutu u ovom radu na primjeru kanala za navodnjavanje Biđ-Bosutskog polja, primjenjujući prikazane korelacije, treba uzeti s rezervom. Upotrijebljen je mali broj uzoraka za usporedbu (25) koji nije statistički relevantan. Profil tla se sastojao od malog broja različitih materijala: 16 uzoraka glina različite plastičnosti sa značajnim udjelom pijeska, 5 uzoraka čistog pijeska, 3 uzorka glinovitog pijeska i samo jedan uzorak visokoplastične gline. Nije bilo uzoraka prašiniastih pijesaka, niti uzoraka praha različitih plastičnosti s različitim

udjelom pijeska. Za primjenu ovih korelacija u praksi trebalo bi provesti opsežno istraživanje na velikom broju uzoraka koji će sadržavati veliki broj ili gotovo sve grupe tla koje se navode u USCS i ESCS klasifikaciji.

7. Zaključak

Klasificiranje tla uobičajeno se provodi na temelju rezultata laboratorijskih pokusa provedenih na poremećenim uzorcima tla iz probnih bušotina. Uzorci se vade, u prosjeku, na svaka dva metra dubine, odnosno kod promjene sloja, pa je to i maksimalna rezolucija opisivanja i klasificiranja tla. Primjenom statičkog penetracijskog pokusa mogu se dobiti podaci o tlu na svaka dva centimetra dubine, što omogućava dobivanje

pouzdanijih podataka o tlu. Klasificiranje tla pomoću rezultata statičkog penetracijskog pokusa predstavlja, već dugo vremena, velik izazov u geotehničkom inženjerstvu.

Za klasificiranje tla koriste se četiri grupe parametara. Razvijene su izravne i posredne korelacije s rezultatima CPT pokusa za svaki od parametara koji služi za klasificiranje tla. Primjena rezultata CPT pokusa za klasifikaciju tla na kanalu za navodnjavanje Biđ-Bosutskog polja pokazala je relativno uspješno korištenje prikazanih korelacija, uz napomenu da je upotrijebljen mali broj uzoraka i mali broj različitih vrsta tla. Preporučuje se da se za klasificiranje tla u statističkim analizama ili primjenom umjetne inteligencije svaki parametar svrstava u pojedine intervale umjesto određivanja njegove brojčane vrijednosti.

LITERATURA

- [1] Casagrande, A.: Classification and identification of soils, *Proc. ASCE*, 73 (1947) 6, pp. 783-810.
- [2] ASTM D2487-11: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [3] Dumbleton, M.J.: *The classification and description of soils for engineering purposes: a suggested revision of the British system*, Ministry of Transport, RRL Report LR 182, Road Research Laboratory, Crowthorne, Berks. 1968.
- [4] Dumbleton, M.J.: *The British soil classification system for engineering purposes: its development and relation to other comparable systems*, TRRL Report LR 1030, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berks, 1981.
- [5] BS 5930:1990: *British Standard. Code of practice for site investigations*. British Standards Institute, London, 1990.
- [6] DIN 18196:2011-05: *Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011.
- [7] Kovačević, M.S., Jurić-Kačunić, D.: Europska klasifikacija tla za inženjerske potrebe, *GRADEVINAR*, 66 (2014) 10, pp. 801-810.
- [8] HRN EN ISO 14688-1:2008 en: *Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Identifikacija i klasifikacija tla - 1. dio: Identifikacija i opis*. Zagreb, Hrvatski zavod za norme, 2008.
- [9] HRN EN ISO 14688-1:2008/A1:2013 en: *Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Identifikacija i klasifikacija tla - 1. dio: Identifikacija i opis - Amandman 1*. Zagreb, Hrvatski zavod za norme, 2013.
- [10] HRN EN ISO 14688-2:2008 en: *Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Identifikacija i klasifikacija tla - 2. dio: Načela klasifikacije*. Zagreb, Hrvatski zavod za norme, 2008.
- [11] HRN EN ISO 14688-2:2008/A1:2013 en: *Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Identifikacija i klasifikacija tla - 2. dio: Načela klasifikacije - Amandman 2*. Zagreb, Hrvatski zavod za norme, 2013.
- [12] Kovačević, M.S., Jurić-Kačunić, D., Librić, L.: Prilagodba hrvatskog graditeljstva europskim smjernicama za opis i klasifikaciju tla, *Izazovi u graditeljstvu* 3, Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Hrvatski savez građevinskih inženjera, pp. 163-193, 2015.
- [13] Marčić, D., Kovačević, M.S., Cvetković, M.: Ispitivanja koeficijenta propusnosti tla na kanalu za navodnjavanje Biđ-Bosutskog polja, *Dani gospodarenja vodama 2013, Napredak kroz znanost*, Zagreb, pp. 171-200, 2013.
- [14] Begemann, H.K.S.: The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile, *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ICSMFE, Montreal, pp. 17-20, 1965.
- [15] Sanglerat, G., Nhim, T.V., Sejourne, M., Andina, R.: Direct soil classification by static penetrometer with special friction sleeve, *Proceedings of the First European Symposium on Penetration Testing*, ESOPT-1, pp. 337-344, 1974.
- [16] Schmertmann, J.H.: *Guidelines for cone test, performance, and design*, Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78209, Washington, 1978.
- [17] Douglas, B.J., Olsen, R.S.: Soil classification using electric cone penetrometer, American Society of Civil Engineers, ASCE, *Proceedings of Conference on Cone Penetration Testing and Experience*, St. Louis, pp. 209-227, 1981.
- [18] Jones G.A., Rust, E.: Piezometer penetration testing, CPTU, *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, ESOPT-2, Amsterdam, 2 (1982), pp. 607-614.
- [19] Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., Grieg, J.: Use of piezometer cone data, *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, ASCE, Blacksburg, pp. 1263-1280, 1986.
- [20] Robertson, P.K.: Soil classification using the cone penetration test, *Canadian Geotechnical Journal*, 27 (1990) 1, pp. 151-158, <https://doi.org/10.1139/t90-014>
- [21] Robertson, P.K.: Interpretation of cone penetration tests - a unified approach, *Canadian Geotechnical Journal*, 49 (2009) 11, pp. 1337-1355, <https://doi.org/10.1139/T09-065>
- [22] Mayne, P.W.: Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests. *Proceedings, 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing*, Las Vegas, pp. 47-73, 2014.
- [23] ASTM D 422-63: *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

- [24] HRS CEN ISO/TS 17892-4:2008 en: *Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Laboratorijsko ispitivanje tla - 4. dio: Određivanje granulometrijskog sastava*, Zagreb, Hrvatski zavod za norme, 2008.
- [25] ASTM D 4318-10: *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [26] HRS CEN ISO/TS 17892-12:2008 en: *Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Laboratorijsko ispitivanje tla - 12. dio: Određivanje Atterbergovih granica*, Zagreb, Hrvatski zavod za norme, 2008.
- [27] Long, M.: Design parameters from in situ tests in soft ground - recent developments. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, London, pp. 89-116, 2008, <https://doi.org/10.1201/9780203883198.ch6>
- [28] Olsen, R.S., Mitchell, J.K.: CPT stress normalization and prediction of soil classification. *Proc., Int. Symp. on Cone Penetration Testing*, CPT 95, 2 (1995), pp. 257-262.
- [29] Robertson, P.K., Wride, C.E.: Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test, *Canadian Geotechnical Journal*, 35 (1998), pp. 442-459, <https://doi.org/10.1139/t98-017>
- [30] Idriss, I.M., Boulanger, R.W.: *Soil Liquefaction During Earthquake*, Earthquake Engineering Research Institute, EERI Publication MNO-12, 2008.
- [31] Cetin, K.O., Ozan, C.: CPT-Based Probabilistic Soil Characterization and Classification, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (2009) 1., pp. 84-107, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:1\(84\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:1(84))
- [32] Yi, F.: Estimating soil fines contents from CPT data, *Proc. 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing*, Huntington Beach, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 949-955, 2014.
- [33] Pease, J.W.: Case studies of CPT site specific correlation with normalized soil behavior type evaluation and fines content, *Proc. 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing*, Huntington Beach, Las Vegas, pp. 573-582, 2014.
- [34] Roy, S., Dass, G.: Statistical models for the prediction of shear strength parameters at Sirsa, India. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 4 (2014) 4, pp. 483-498.
- [35] Lun, A.C.Y.: *Influence of grain size distribution on shear strength of sand*, UG Thesis, Universiti Teknologi, Malaysia, 2011.
- [36] Ahsan, Z., Chik, Z., Abedin, Z.: The Relationship Of Particle Gradation And Relative Density With Soil Shear Strength Parameters From Direct Shear Tests, *Aust. J. Basic & Appl. Sci.*, 8 (19), pp. 271-275, 2014.
- [37] Kulhawy, F.H., Mayne, P.W.: *Estimating Soil Properties for Foundation Design*, EPRI Report EL-6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto, 1990.
- [38] Uzielli, M., Mayne, P.W., Cassidy, M.J.: *Probabilistic assessment of design strengths for sands from in-situ testing data*. Modern Geotechnical Design Codes of Practice, Advances in Soil Mechanics & Geotechnical Engineering (series), 1 (2013), pp. 214-227.
- [39] Robertson, P.K., Campanella, R.G.: Interpretation of cone penetration tests - Part I (sand). *Canadian Geotechnical Journal*, 20 (1983) 4, pp. 718-733, <https://doi.org/10.1139/t83-078>
- [40] Ozan, C.: *Estimation of grain characteristics of soils by using CPT data*. MS thesis, Middle East Technical Univ. 2003.
- [41] Zein, A.K.M.: Use of cone penetration test for classification of local soils, *BRR Journal*, 5 (2003), pp. 23-29.